

고효율 Solar Cell 제조를 위한 Firing 공정 조건의 최적화 Optimization of the firing process condition for high efficiency solar cells on single-crystalline silicon

정 세 원, 이 성 준*, 홍 상 진*, 한 승 수
명지대학교 정보공학과, 전자공학과*, 명지정보통신연구소

Abstract

This paper represents modeling and optimization techniques for solar cell process on single-crystalline float zone (FZ) wafers with high efficiency; There were the four significant processes : i)emitter formation by diffusion, anti-reflection-coating (ARC) with silicon nitride using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD); iii)screen-printing for front and back metallization; and iv)contact formation by firing. In order to increase the performance of solar cells, the contact formation process is modeled and optimized. This paper utilizes the design of experiments (DOE) in contact formation to reduce process time, fabrication costs. The experiments were designed by using central composite design which is composed of 2^4 factorial design augmented by 8 axial points with three center points. After contact formation process, the efficiency of the solar cell is modeled using neural networks. This model is used to analyse the characteristics of the process, and to optimize the process condition using genetic algorithms (GA). Finally, find optimal recipe for solar cell efficiency.

I. 서론

현재 각 국가에서는 화석연료를 대체 할 수 있는 친환경 대체에너지 개발에 박차를 가하고 있다. 특히 무공해, 무한정 에너지원인 태양에너지의 관심이 고조되고 있다. 하지만 현재까지 태양에너지가 널리 사용되지 못하고 있는데, 그 이유는 변환 효율이 화석연료와 비교하여 상당히 낮기 때문이다. 따라서 제조 공정상에서 태양전지의 효율을 높일 수 있는 방법을 찾는 것이 무엇보다도 중요하다.

그림 1은 태양전지의 제조 공정을 보여준다. 태양전지 제조 공정 중에서 접촉 형성 (Contact Formation)은 공정의 경제적인 측면과 효율에 밀접한 관계가 있는 공정으로 중요하다[1][2].

접촉 형성 공정은 Belt Furnace (그림 2)에 의해서 이루어지는 Firing 공정에 의하여 형성 되는데 Belt Furnace 내 온도에 따라 전·후면 Metallization된 금속들이 녹으면서, 접촉이 생성되게 된다.

위에서 설명한 접촉형성 공정에 대한 실험을 하기 위해 실험계획법을 이용하여 실험을 설계 하였다. 또한 실험 데이터를 이용하여 모델링을 통해 예측하고, 그 모델링을 통해 유전자 알고리즘을 이용하여 최적의 공정 파라미터 찾아냈다.

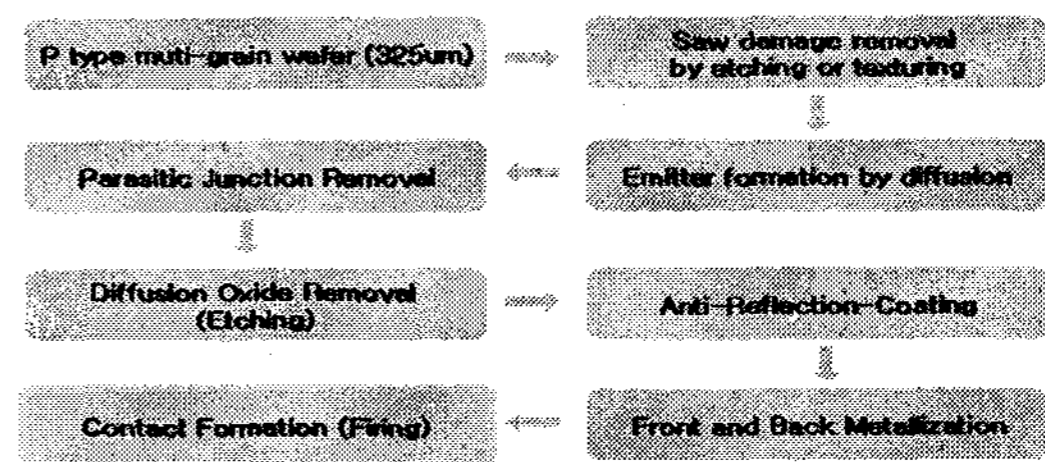


그림 1. Solar Cell 제조 공정

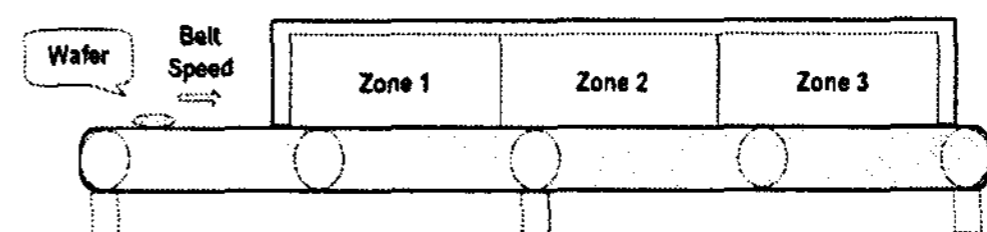


그림 2. Belt furnace

II. 실험방법

Firing 공정 실험을 설계하기 위해 실험 계획법 (Design of Experiment: DOE) 중 Central Composit Design을 이용하여 설계 하여, 표 1 과 같이 총 32번의 실험을 하였다.

표 1. 실험 횟수 계획

Structure	Number of Experiments
Full factorial (2^4)	16
Axial point (8)	8
Center point (1×3)	3
Random point (6)	6
Sum	32

Zone1, 2에서 Metallization되어있는 금속이 합금이 생성되는 온도가 되면 접촉이 형성된다 (후면: AlSi 577°C, 전면: AgSi 830°C).

위 조건으로 실험에 쓰인 입력 파라미터의 값을 표 2와 같이 결정하였다.

표 2. 실험에 쓰인 입력 파라미터

Zone 1 Temperature(°C) Δ=15					Zone 2 Temperature(°C) Δ=15				
-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
545	560	575	590	605	800	815	830	845	860

Zone 3 Temperature(°C) Δ=15					Belt-speed (inch/min) Δ=2.5				
-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
830	845	860	875	890	110	112.5	115	117.5	120

실험계획이 수립된 후 실험계획에서 결정된 조건으로 실제 실험을 수행한 결과를 가지고 효율 (Efficiency)에 대하여 신경망 (Neural network)으로 모델링을 하였다.(표 3, 4)

표 3. 신경망 모델링의 파라미터

Training Data : Test Data	7 : 3
Structure	4-8-4-1
Training Tolerance	0.05

표 4. Training/Test RMSE (Root Mean Square Error)

Training RMSE	Test RMSE
1.345	1.703

신경망 모델링 결과 분석에 의하면 Zone 2와 Zone 3의 온도에 따른 효율의 변화가 다른 파라미터 (Zone 1, Belt-speed)의 값과 민감하였지만, Zone 2와 Zone 3의 공통적인 특징은 모두 값이 낮을 때 효율이 상대적으로 높았으므로, 두 개의 입력 파라미터를 Low Value (Zone 2는 800°C, Zone 3는 830°C)로 고정하여 Response Surface Plot을 그려 분석하였다.

Zone 1의 온도가 낮을 때 효율이 가장 높았다. 또한, Belt-speed의 속도가 효율에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 분석되었다. 특히 Zone 1의 온도가 545°C일 때 Belt-speed를 110 ~ 120 inch/min까지 변화될 때 효율의 차이는 1.16%로 나타났다.

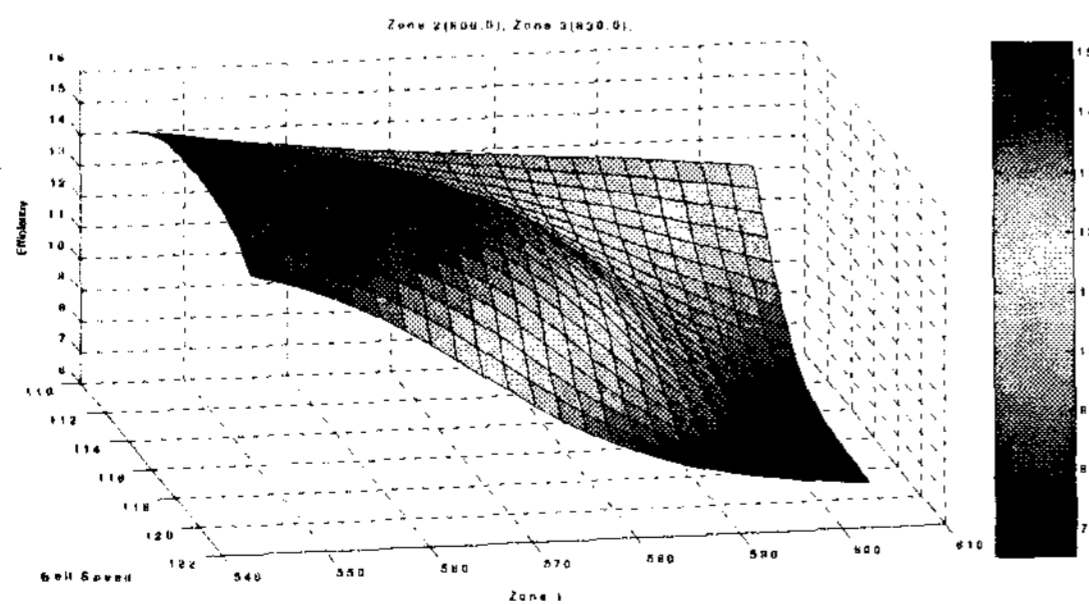


그림 3 신경망 모델링을 이용한 Response Surface Plot

이러한 신경망 모델을 이용하여 효율을 최대화하기 위하여 공정 파라미터 값을 최적화하기 위하여 유전자 알고리즘 (GA)을 사용하였다. 유전자 알고리즘에 사용된 파라미터는 다음 표 5와 같다.

표 5. 유전자 알고리즘의 파라미터

Weights	1.0
Desired	20
Population	100
Max Generation	400
Minimum Error	0.05
Probability of Crossover	0.65
Probability of Mutation	0.01

유전자 알고리즘으로 최대의 효율이 나올 수 있는 공정 파라미터(recipe)를 찾아보았는데, 그 결과는 다음 표 6과 같다.

표 6. 유전자 알고리즘 (GA)를 이용하여 구한 최적조건 recipe

Zone 1	Zone 2	Zone 3	Belt-speed
556.554	812.434	885.484	119.013
551.862	815.953	876.921	113.988

III. 결 론

실험 계획법 (DOE)을 이용하여 특징적인 점들을 실험 조건으로 정하여 실험 횟수를 줄여 실험에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있었으며, 그 실험에 의해 만든 신경망 모델링으로 예측하여 많은 실험을 한 것과 비슷한 효과를 얻을 수 있었다.

향후 연구과제로는 유전자 알고리즘을 통해 찾게 된 recipe를 효율을 최대로 증가시킬 수 있는 파라미터인지 실험을 통한 검증실험을 하여야 할 것이다.

[참고문헌]

- [1] W. Jooss, W. Neu, F. Faika, H. Knauss, A. Kress, S. Kelier, P. Fath, and E. Bucher, "Process and technology development for back contact silicon solar cells," IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth, pp. 122 - 125
- [2] 이재형, 임동건, 이준신, "태양전지 원론" 홍릉과학출판사, pp. 87~100, 2005.
- [3] S. Han, L. Cai, May G. May, A. Rohatgi, "Modeling the Growth of PECVD Silicon Nitride Films for Solar Cell Applications Using Neural Networks," Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on Vol 9, No. 3, pp. 303 - 311 1996